



УДК 621.039.534

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ PIV-МЕТОДА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ОБТЕКАНИЯ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ

VERIFICATION OF MATHEMATICAL MODELS OF FLOW AROUND A SPHERICAL ELEMENT BY THE PIV-METHOD

Никитин Александр Дмитриевич, магистрант каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: studentshurik@gmail.com, Тел.: +7(912)2157567

Климова Виктория Андреевна, ст. преп. каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.a.klimova@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-95-08

Щеклеин Сергей Евгеньевич, д-р. техн. наук, профессор, зав. каф. «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru. Тел.: +7(343)375-95-08

Alexander D. Nikitin, Master student, Department «Nuclear power plants and renewable energy sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: studentshurik@gmail.com. Ph.: +7(912)2157567

Victoria A. Klimova, Senior Lecturer, Department «Nuclear power plants and renewable energy sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.a.klimova@urfu.ru. Ph.: +7(343)375-95-08

Sergey E. Shcheklein, Doctor Sc., Prof., Department «Nuclear power plants and renewable energy sources», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru. Ph.: ++7(343)375-95-08

Аннотация. При создании высокотемпературных газоохлаждаемых ядерных реакторов альтернативой засыпке из шаровых тепловыделяющих элементов является подвес шаровых элементов в каналах с специально организованным потоком газа. При этом отсутствуют термомеханические напряжения тепловыделяющих элементов, и значительно интенсифицируется теплообмен. Целью данного исследования является экспериментальная верификация математической модели обтекания шарового тепловыделяющего элемента с помощью метода цифровой трассерной визуализации (PIV-метод). Экспериментально получено поле скорости при обтекании шарового элемента, которое позволило установить достоверность разработанной ранее математической модели.

Abstract. When a high-temperature gas-cooled nuclear reactors are creating, alternative of spherical fuel elements backfilling is a suspension of spherical elements in channels with specially organized gas flow. Then there are no thermomechanical stresses of the fuel elements, and the heat exchange intensifies greatly. The purpose of this study is experimental verification of mathematical models of flow around a spherical fuel element by the method of particle image velocimetry (PIV-method). The velocity field obtained experimentally in the flow around of spherical element, which allowed to establish the accuracy of the previously developed mathematical model.

Ключевые слова: газоохлаждаемые ядерные реакторы; обтекание потоком шарового элемента; поле скорости; PIV-метод; математическое моделирование.

Key words: gas-cooled nuclear reactors; flow around of spherical element; velocity field; PIV-method; mathematical modeling.

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) являются одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики, так как

могут служить источником энергоснабжения многих технологических процессов. Такие реакторы способны поставлять

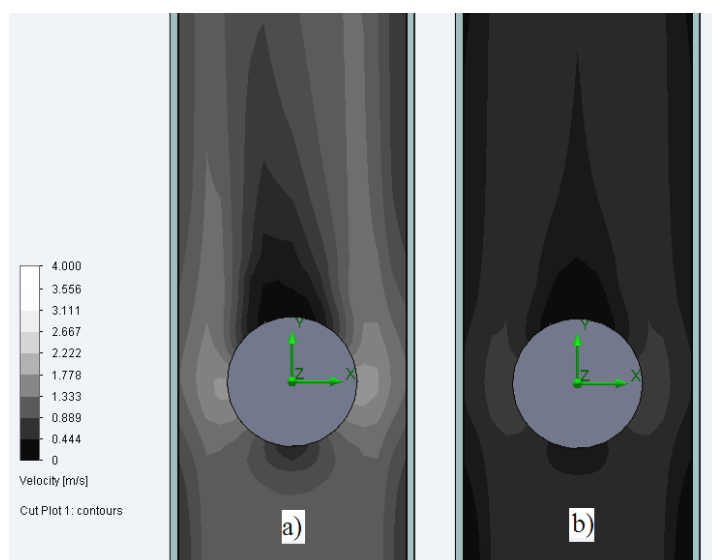


Рис. 1. Распределение скорости по результатам моделирования: а) $Re = 10^4$; б) $Re = 4000$

высокопотенциальную тепловую энергию (с температурой до 900-1000°C) и обеспечивать значительную долю промышленных потребителей. К настоящему моменту разработано много вариантов конструкции ВТГР, однако для промышленных целей наибольшим потенциалом обладают реакторы с шаровыми тепловыделяющими элементами (твэлами) [1–2]. Рассматриваются варианты использования таких твэлов в каналах и в виде шаровых засыпок.

Шаровые засыпки, применяемые в аппаратах, обычно представляют собой плотный дисперсный слой. При этом частицы соприкасаются между собой, хотя через слой и продувается газ. В зонах контакта шаров происходит резкое ухудшение условий теплоотвода, возникает неравномерность температур по поверхности шара, способная в ряде случаев привести к их повреждению вследствие возникновения термомеханических напряжений [3]. Канальное размещение твэлов сохраняет все вышеуказанные недостатки, хотя и имеет ряд технологических преимуществ.

Альтернативой шаровой засыпке является гидродинамический подвес шаров в каналах со специально организованным потоком газа. В этом случае шары не имеют точек соприкосновения и находятся в состоянии интенсивного вращения в потоке, что приводит к образованию вихревых потоков, срыву пограничного слоя и радикально повышает интенсивность теплообмена при отсутствии неравномерности распределения тепловыделения по поверхности шара.

В работе [4] разработана математическая модель для исследования гидродинамики и теплообмена при обтекании свободно взвешенных (левитирующих) в газовом потоке шаровых элементов. Целью данного исследования является

экспериментальная верификация разработанной модели, в частности проверка моделирования поля скорости при обтекании шара потоком.

Компьютерная модель [4] представляет собой канал, в котором расположен шаровой элемент. Кроме того, в канале могут быть расположены вкладки различной геометрии, которые турбулизируют поток газа и позволяют получить лучшие аэродинамические и теплообменные характеристики. Шаровой элемент может быть источником теплоты.

В качестве результатов моделирования рассматриваются картины в сечении, показывающие распределение скоростей потока, траектории потока, а также некоторые интегральные расчетные характеристики (например, сила, действующая на шар со стороны потока). На рис. 1 приведен пример распределения скорости для изотермического течения воздуха в канале без вкладок; диаметр канала равнялся 70 мм, диаметр шара – 40 мм.

Для практического измерения поля скорости применялась PIV-система «Полис», разработанная в ИТ СО РАН. Система позволяет измерять две компоненты вектора скорости одновременно во всем заданном сечении. «Полис» включает в себя: двойной импульсный Nd:YAG-лазер с энергией в импульсе 145 мДж; объектив для формирования лазерного ножа; цифровую кросс-корреляционную камеру Видеоскан 4021 с разрешением 2048×2048 пикселей; синхронизирующий процессор; персональный компьютер с программным обеспечением ActualFlow.

Принцип метода PIV состоит в следующем. Импульсный лазер создает тонкий световой нож и

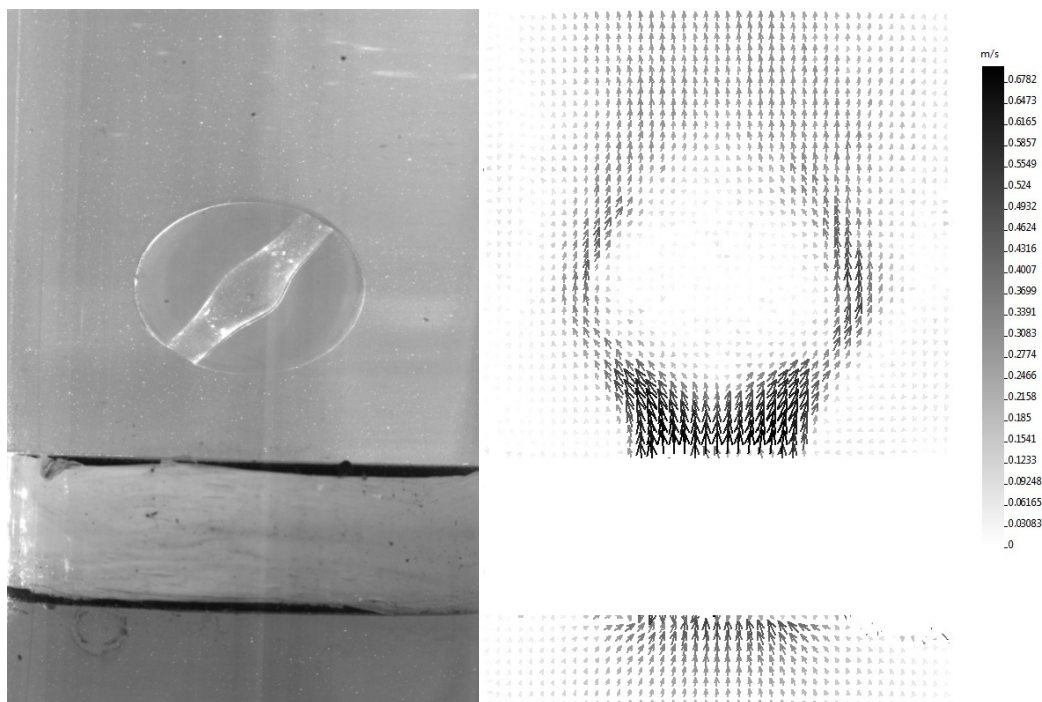


Рис. 2. Результаты экспериментального измерения поля скорости при обтекании шара потоком $Re=4000$

освещает мелкие частицы (трассеры), взвешенные в исследуемом потоке. Положения частиц в момент двух последовательных вспышек лазера регистрируются на два кадра цифровой камеры. Локальная скорость потока определяется расчетом перемещений частиц за время между вспышками лазера. Определение перемещения основано на применении корреляционных методов к трассерным картинкам с использованием регулярного разбиения на элементарные подобласти. Варьирование времени задержки между лазерными вспышками позволяет измерять скорость в диапазоне от долей миллиметра в секунду до сверхзвуковых значений.

В качестве трассеров в эксперименте использовались пластиковые частицы диаметром 5 мкм. Эксперимент проводился на потоке воды с числом Рейнольдса $Re=4000$ (аналогичное использовалось при компьютерном моделировании). Шаровым элементом являлась прозрачная акриловая бусина диаметром 18 мм. Измерительный канал представлял собой трубку из оргстекла внутренним диаметром 43 мм. Бусина подвешивалась с использованием вставки, создающей струю жидкости в центре канала.

Результаты измерения поля скорости при обтекании шара потоком приведены на рис. 2. Как видно из рис. 1 и 2, математическая модель достоверно описывает обтекание шарового элемента потоком.

Таким образом, для экспериментальной верификации результатов моделирования

разработан экспериментальный стенд и введена в эксплуатацию оптическая лазерная система, основанная на технологии импульсной визуализации частиц микро-трассеров (PIV-система). Данная система позволяет получить распределения скоростей в различных зонах взаимодействия потока газа с поверхностью, достоверно определить условия вихреобразования и возникновения отрывных течений, что позволит провести верификацию расчетных моделей, примененных при решении задачи математического моделирования процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лозовецкий В.В. Развитие высокотемпературных газовых реакторов // Атомная техника за рубежом. – 2002. – №7. – С.8-12.
2. Kazuhiko Kunitomi, XingYan, Shusaku Shiozawa, Nozomu Fujimoto. GTNTR300C For Hydrogen Cogeneration // 2nd International Topical Meeting On High temperature reactor technology. Beijing, China, September 22-24, 2004.
3. Богоявленский Р.Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978, 112 с.
4. Климова В.А., Немихин Ю.Е., Щеклеин С.Е. Установка для экспериментальной верификации результатов компьютерного моделирования гидродинамики обтекания тел вращения газовыми потоками. // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №8-9. – С.27-32.